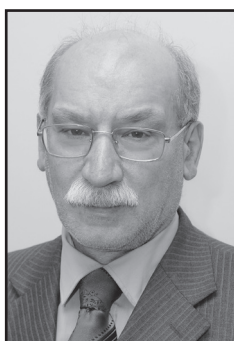




Очереди на железной дороге



Дмитрий ЛЕВИН

Dmitry Yu.LEVIN

Недостаточный учет неравномерности движения поездов при проектировании и реконструкции станций и участков привел к дефициту путей, при техническом нормировании – к занижению необходимых ресурсов, при разработке технологических процессов – к неоправданному занижению показателей и т. д. Для оценки неравномерности целесообразно использовать теорию очередей, которая позволяет адаптировать проектные и нормативно-технологические документы. С помощью моделирования исследован реальный процесс поездной работы, уточнены характеристики очереди поездов, данные об изменении показателей при увеличении интенсивности движения. Полученные результаты повышают достоверность и обоснованность принимаемых решений, нормирования показателей, оперативного планирования и управления поездной и грузовой работой.

Ключевые слова: железная дорога, управление движением, теория очередей, неравномерность перевозок, интенсивность потока поездов, насыщение и перенасыщение участка поездами, проектирование станций и участков, нормативно-технологические документы.

Левин Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Очереди на обслуживание характерны для всех областей деятельности человека. Не стал исключением и железнодорожный транспорт. Первое упоминание об очередях на российских железных дорогах относится к концу XIX века [3], когда ежегодно с осени до весны в период вывоза хлеба (зерна) в адрес южных и прибалтийских портовых станций возникали серьезные заторы в движении поездов. Позже такие же ситуации стали повторяться из-за ожидания приема грузов к перевозке, задержки технологических операций, отправления поездов со станций, подачи вагонов на грузовые фронты и т. д. Но специальные исследования этого вопроса не проводились.

Почти половина времени нахождения вагонов на современных сортировочных станциях – это межоперационные простои, часто вагоны часами, а то и сутками простаивают в ожидании подачи на грузовые фронты, перед поездами на участках нередко подолгу горят желтый и красный огни светофоров. Все это непроизводительные издержки, неэффективное использование подвижного состава и пропускной способности инфраструктуры.

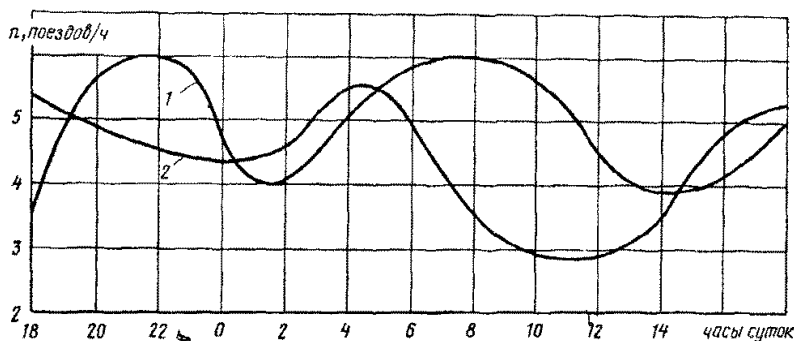


Рис. 1. Изменение интенсивности движения поездов в течение суток: графиковой (1) и фактической (2).

Fig. 1. Changes of train traffic intensity during the day: scheduled traffic diagram (1) and effective train traffic (2).

1.

Сейчас организация вагонопотоков осуществляется на основе плана формирования, в котором целесообразность появления составов выделенных назначений определяется превышением приведенной экономии в пути следования от пропуска без переработки на попутных сортировочных станциях над затратами на накопление составов на станции формирования [4]. При этом принимается, что все сформированные составы следуют строго по графику с одинаковыми затратами времени в пути. Причем затраты времени поездов различных назначений не учитываются.

При проектировании станций и участков, разработке нормативно-технологических документов, техническом нормировании показателей эксплуатационной работы необоснованно исходят из того, что перевозочный процесс происходит равномерно. В результате на железнодорожном транспорте — острейший дефицит путей на станциях, нехватка пропускной способности на важнейших направлениях, недостаток перерабатывающей способности на сортировке, загрузка многих грузовых фронтов выше оптимальной, планируемые размеры движения поездов часто больше наличной пропускной способности участков, нередко на станциях формируют больше составов, чем можно своевременно обеспечить локомотивами.

Общей причиной возникновения очередей на железных дорогах является несоответствие потоков грузов, вагонов, составов, поездов и возможностей их обслужи-

вания. Даже когда среднесуточный размер потока может не превышать пропускной, перерабатывающей, выгрузочной возможностей, его неравномерность и колебания времени обслуживания все равно приводят к очередям.

Начало исследованиям по неравномерности перевозочного процесса положил проф. А. К. Угрюмов в 1968 году [5]. Затем большое число публикаций на эту тему показало объективность явления. Например, в первой половине суток выгружается только 20% вагонов. Но констатация очевидной неравномерности пока не меняет ситуации. Реальность значительно отличается от нормативных условий.

Поездная работа — типичная система массового обслуживания. Поэтому для оценки движения поездов целесообразно использовать ее характеристики:

- входящий поток поездов, определяемый интенсивностью поездообразования и распределением интервалов поступления составов;
- средства связи по движению поездов (механизм обслуживания), определяющие интервалы между поездами, продолжительность обслуживания (занятия блок-участков, перегонов) и распределение межпоездных интервалов;
- организация движения поездов (дисциплина обслуживания), определяющая приоритеты пропуска поездов.

Наиболее простым выглядит регулярный входящий поток, при котором требования поступают по одному в моменты времени с интервалом t . Интенсивность



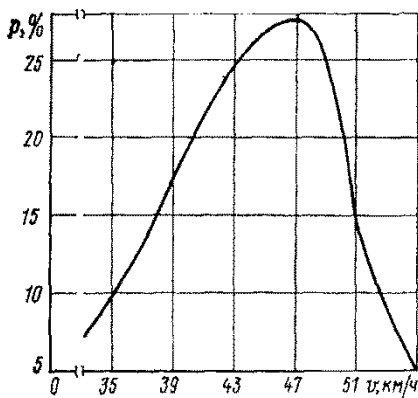


Рис. 2. Распределение ходовой скорости движения поездов на участке.

Fig. 2. Distribution of running speed within a railway section.

поступления такого потока равна $\alpha = 1/t$ в единицу времени. Примером является движение поездов по расписанию, которое твердо выполняется пассажирскими поездами.

Самым распространенным считается поток, при котором требования поступают совершенно случайно — это так называемый простейший входящий поток требований. Но если рассматривать длительные периоды времени, то наблюдаются изменения интенсивности потока поездов (рис. 1).

Поэтому движение при регулярной детерминированной основе, определяемой графиком, по своей физической природе —

процесс вероятностный. Такой поток называется рекуррентным и является обобщением двух предыдущих.

Условия пропуска поездов по участкам оценим характеристиками обслуживания. Во-первых, затраты времени на пропуск поездов по блок-участкам и участку в целом, то есть длительность обслуживания. Длительность отличается распределением продолжительности обслуживания. Другой характеристикой обслуживания выступает пропускная способность участка, она определяется максимальным числом поездов, которое может пропустить этот отрезок пути за единицу времени. Третья качественная черта обслуживания — доступность. Железнодорожные участки являются пол-
нодоступными системами.

2.

Продолжительность занятия поездами блок-участков и перегонов зависит от ходовой скорости. Для того чтобы реализовать установленную скорость и выполнить другие нормативы графика движения, поезда должны следовать «под зеленый на зеленый» огонь путевого светофора, т. е. показания светофоров не должны меняться перед поездами. Это условие выполняется при расхождении между поездами более трех блок-участков для трехзначной автоблокировки. Чем меньше плотность потока поездов, тем свободнее себя чувствуют машинисты, тем выше скорость они развивают.

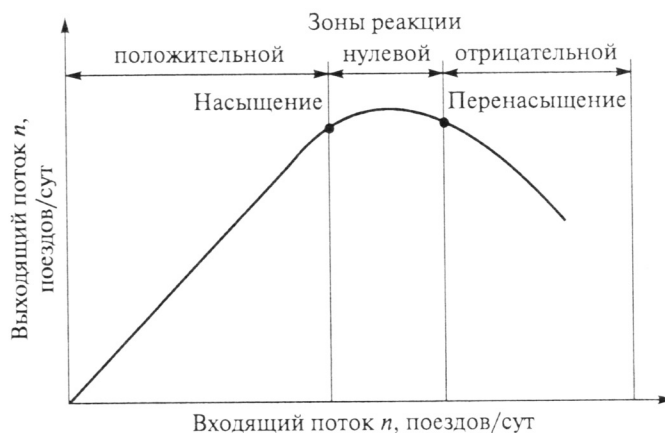


Рис. 3. Реакция участка на увеличение входящего потока поездов.

Fig. 3. Reaction of a railway section to the growth of incoming train flow (horizontal axis — incoming flow n , trains per day; vertical axis — outcome flow n , trains per day; top — zones of reaction: (three columns entitled in the top from left to right — positive, zero, negative sectors; left column underneath entitled «saturation»; middle column not entitled; right column entitled «oversaturation»)).

Расшифровка скоростемерных лент показала, что машинисты грузовых поездов почти всегда следуют со скоростью меньше расчетной или установленной предупреждением об ограничении (рис. 2). При следовании под зеленый на зеленый огонь путевого светофора, когда расстояние между поездами более трех блок-участков, расчетная норма ходовой скорости в среднем не выполняется на 20%, а графиковая — на 8%. Если расстояние между поездами менее трех и более двух блок-участков и часть пути они следуют на желтый огонь, средняя скорость соответственно ниже нормы на 46% и 38%, после проследования же путевого светофора с желтым огнем — на 63%. Фактическая скорость движения поездов отличается от расчетной в широком диапазоне от 0,2 до 1,2. Большой разброс объясняется прежде всего разной квалификацией машинистов, неодинаково реагирующих на показания светофоров, зачастую осуществляя преждевременное торможение.

Практика показывает, что машинисты ведут поезда с максимально допустимой скоростью лишь в исключительных случаях и кратковременно, так как это сопряжено с чрезмерно напряженным режимом работы бригады, агрегатов локомотива и повышением расхода электроэнергии и топлива. Существенные поправки в фактический диапазон скоростей движения вносят погодные условия, профиль и план пути, состояние локомотива.

Любое снижение скорости движения поездов по сравнению с расчетной для данного участка, а тем более перерыв в движении приводят к потерям в использовании пропускной способности и соответственно к экономическим потерям. Задержки поездов на перегонах вызываются: несинхронностью движения поездов, несвоевременным открытием сигналов на станциях, возникновением неисправностей подвижного состава и технических устройств, перенасыщением участков поездами, наличием предупреждений об ограничении скорости движения и пропуском опаздывающих пассажирских поездов.

При несинхронности движения поезда следуют вместо зеленого на желтый, а часто и на красный огонь светофора. Так, если пачка поездов следует с 6-минутными меж-

поездными интервалами и один из локомотивов снизит скорость против средней графиковой всего лишь на 5 км/ч, идущий за ним поезд через 1,5 мин подойдет к светофору с желтым огнем. Несинхронность следования объясняется тем, что машинисты пользуются расписанием движения поездов, в котором указано только время хода по перегонам. Скорость следования на различных элементах профиля пути определяют экспертно, выбор режима движения во многом зависит опять же от квалификации машинистов.

На задержки поездов при возникновении неисправностей вагонов, локомотивов, пути, устройств СЦБ и связи, контактной сети и т. п. влияют средства связи по движению поездов, число главных путей, вид тяги, межпоездной интервал и количество пассажирских маршрутов. Отказы в работе технических устройств сокращают наличную пропускную способность участков до 15%.

3.

Фактическое число предупреждений об ограничении скорости движения поездов на многих участках сети больше, чем предусмотрено графиком. Общее расстояние, проходимое поездом с ограничением скорости $l_{огр}$, равно сумме протяженности действия предупреждения $l_{пр}$, длине поезда $l_{п}$ и расстояния, проходимого с пониженной скоростью $v_{огр}$ с учетом замедления и разгона поезда до и после места, где ограничена скорость. Расстояние с ограничением скорости в среднем в 2,5 раза больше протяженности пути действия предупреждения. Анализ скоростемерных лент показал, что фактическая скорость ниже установленной предупреждением в среднем на 20–25%. Количество поездов, на которые влияет ограничение скорости на подходе к месту его действия:

$$N = \frac{(v_{сп} - v_{огр})l_{огр}}{v_{огр}(v_{сп}I - l_{п} - pL_{6-y})} - 1,$$

где $v_{огр}$ — средняя скорость движения поездов, км/ч; I — межпоездной интервал, ч; p — минимальное число блок-участков, разграничивающих поезда, при котором обеспечено устойчивое движение на зеленый огонь светофора (для трехзначной автоблокировки $p = 3$); L_{6-y} — средняя длина блок-участка, км.





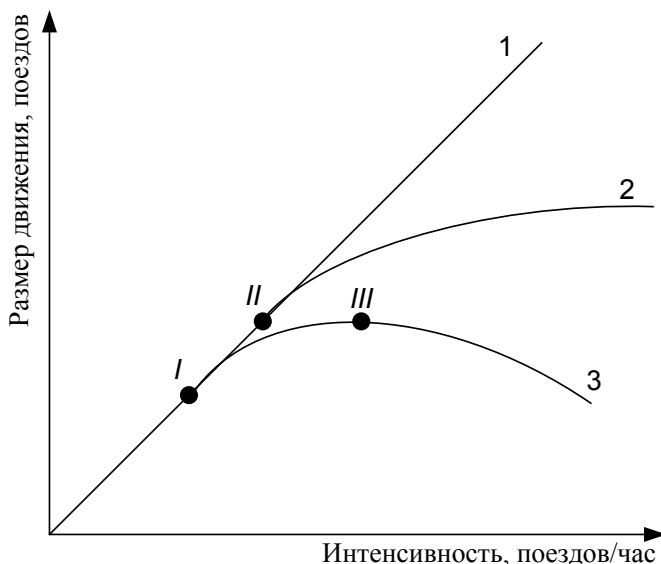
Рис. 4. Поездотоки: 1 – подходящий; 2 – входящий; 3 – выходящий с участка А – Б.

Рис. 4. Train flows regarding section A – B: 1 – approaching, 2 – incoming, 3 – outcome flow.



Рис. 5. Зависимость размеров движения на подходе (1), входе (2) и выходе с участка (3) от интенсивности потока поездов.

Рис. 5. Dependency of traffic volume for a railway section at the approach (1), entrance point (2) and coming out point (3) on intensity of train flow.



Пропуск опаздывающих пассажирских поездов задерживает движение 10–15% грузовых.

Наряду с факторами, отрицательно действующими на выполнение графика движения, есть и положительные, прежде всего резерв мощности локомотивов при следовании с неполновесными поездами. Фактически средний вес поездов на 10–15% меньше нормы, что позволяет им идти с большей скоростью, чем предусмотрено графиком. Но как показывает анализ скоростемерных лент, из-за отсутствия взаимодействия диспетчерского аппарата с локомотивными бригадами возможность эта не реализуется.

Другими возможностями уменьшения влияния задержек на выполнение графика движения являются сокращение времени простоя составов на станциях технического обслуживания (в некоторых поездах потребность в ремонте может вообще отсутствовать) и использование свободных «ниток» графика для ускорения пропуска

поездов. Изменение порядка пропуска поездов на однопутных участках сокращает число скрещений поездов и продолжительность их стоянки на станциях по сравнению с максимальным графиком.

Решающее значение для сокращения задержек поездов имеет оптимизация регулирования загрузкой участков и станций.

Желание пропустить больше поездов, чем по нормам способен участок, приводит к обратному результату (рис. 3) [6].

Начальный участок этой зависимости может быть аппроксимирован линейной функцией и соответствует положительной его реакции на возрастание интенсивности входящего потока поездов, т. е. любое увеличение входящего потока приводит к возрастанию выходящего потока. Участок сохраняет положительную реакцию до тех пор, пока не будет достигнуто состояние насыщения поездами. После этого дальнейшее увеличение интенсивности входящего потока практически не приводит к возрастанию выходящего потока. При достижении

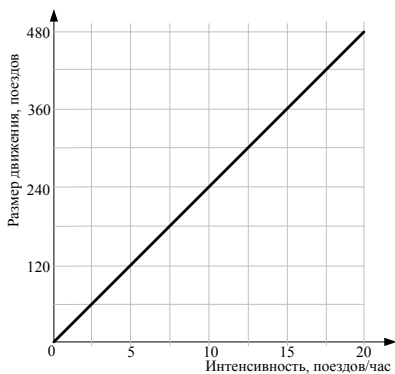


Рис. 6. Зависимость между интенсивностью и размерами движения на подходе к участку.

Pic. 6. Interdependency between intensity and traffic volume at the approaches of the section.

состояния перенасыщения любое увеличение интенсивности входящего потока поездов сокращает размер выходящего.

Но кроме входящего и выходящего потоков есть еще и подходящий (подводящий) к участку поток поездов (рис. 4).

С помощью имитационного моделирования движения поездов на реальном участке удалось заглянуть вглубь поездной работы. Рассматривалось постепенное увеличение интенсивности (уменьшение межпоездного интервала) подходящего к участку потока поездов (рис. 5). При небольших размерах движения подходящий, входящий и выходящий потоки были равны и одинаково линейно возрастали.

Достигнув точки насыщения участка поездами (I на рис. 5), при дальнейшем увеличении интенсивности поток поездов на подходе и входе на участок продолжает линейно возрастать до точки II. После при дальнейшем сокращении межпоездного интервала поток поездов на подходе к участку линейно возрастает, а входящий, хотя тоже возрастает, но нелинейно и на меньшую величину. Выходящий с участка поток поездов после точки I нелинейно замедляет рост до достижения максимального значения в точке III, после которой начинает нелинейно уменьшаться.

4.

Возвращаясь к реальному участку, рассмотрим изменение величины потока поездов и характеристики их очереди на подходе, входе и выходе с участка.

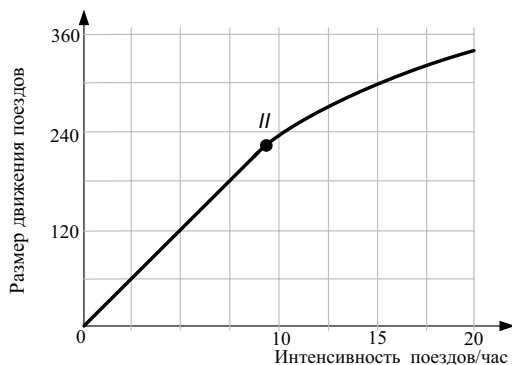


Рис. 7. Зависимость между интенсивностью подхода поездов и размерами движения на входе участка.

Pic. 7. Interdependency between intensity of approaching trains' traffic and traffic volume at the entrance point of a section.

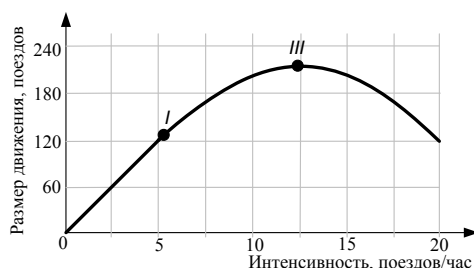


Рис. 8. Зависимость между интенсивностью подхода поездов и размерами движения на выходе с участка.

Pic. 8. Interdependency between intensity of approaching trains' traffic and traffic volume at the coming out point of a section.

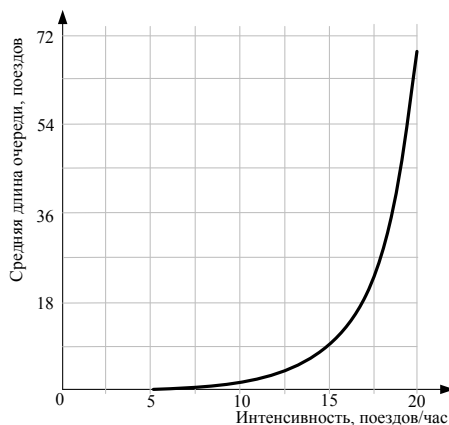


Рис. 9. Влияние интенсивности подхода поездов на среднюю длину очереди поездов перед участком.

Pic. 9. Impact of approaching trains' intensity on the average length of train queuing in front of a section.



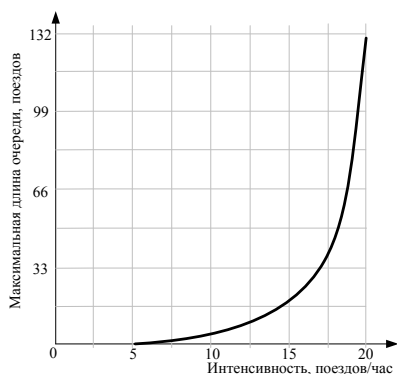


Рис. 10. Влияние интенсивности подхода поездов на максимальную длину очереди поездов перед участком.

Pic. 10. Impact of approaching trains' intensity on the maximum length of train queuing in front of a section.

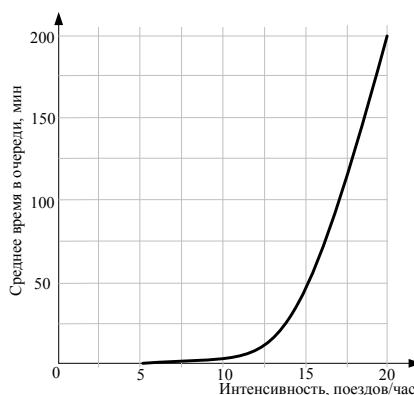


Рис. 11. Влияние интенсивности подхода поездов на среднее время нахождения их в очереди перед участком.

Pic. 11. Impact of approaching trains' intensity on the mean time of train queuing in front of a section

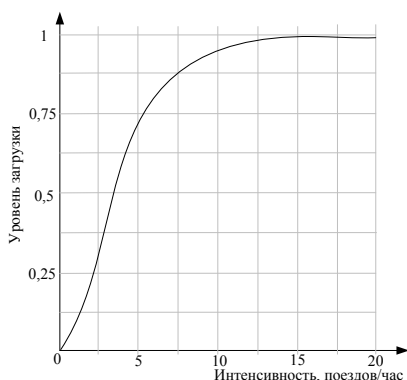


Рис. 12. Влияние интенсивности подхода поездов на уровень загрузки участка.

Pic. 12. Impact of approaching trains' intensity on the level of a section's loading.

При сокращении межпоездного интервала на подходе к участку:

- линейно увеличивается интенсивность движения поездов на подходе к участку (рис. 6);
- линейно увеличивается интенсивность входящего потока поездов до точки II, после которой замедляется нелинейное увеличение интенсивности (рис. 7);
- линейно увеличивается интенсивность выходящего потока поездов до точки I, после которой до точки III (максимальное значение размеров движения на участке) замедляется нелинейное увеличение, а затем поток поездов нелинейно уменьшается (рис. 8);
- увеличивается средняя длина очереди поездов на подходе к участку (рис. 9) и максимальная длина очереди (рис. 10);

— среднее время нахождения поездов в очереди (рис. 11);

— возрастает загрузка участка (рис. 12).

При увеличении насыщенности участка поездами возрастает их влияние друг на друга, и они все чаще следуют на желтый и красный сигналы светофора. В результате снижается скорость движения. Увеличивается время занятия поездами блок-участков, возникает и возрастает очередь в ожидании пропуска по участку.

На рассматриваемом участке установлен межпоездной интервал 6 мин.

При моделировании очередь поездов перед участком возникала уже при межпоездном интервале 8 мин. Моделировался межпоездной интервал и меньше, чем встречается на практике, но и тогда загрузка участка не достигала 1 (рис. 12). Это объясняется тем, что не встречается поток из грузовых поездов с однородными техническими характеристиками, как и машинисты локомотивов — с одинаковыми навыками вождения. Кроме того, при высокой интенсивности движения поездов поток становится чрезвычайно нестабильным.

Для лучшего использования наличной пропускной способности участков необходимо «подпор» поездов, т. е. их очередь на подходе. Для каждого участка существует рациональная длина очереди поездов, которая должна учитываться при нормировании и оперативном планировании поездной работы. Оптимизировать длину

очереди позволяет управление составо-бразованием на сортировочных станциях.

Дальнейшее исследование очередей на железных дорогах позволит формализовать влияние неравномерности на все процессы эксплуатационной работы и использовать выявленные закономерности:

- при проектировании станций, участков, грузовых фронтов и др.;
- при разработке нормативно-технологических документов (графика движения, плана формирования поездов, технологических процессов работы предприятий);
- при техническом нормировании эксплуатационной работы;

- при оперативном планировании и управлении поездной и грузовой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокс Д. Р., Смит У. Л. Теория очередей. — М.: Мир, 1966. — 218 с.
2. Вагнер Г. М. Основы исследования операций. — М.: Мир, 1972. Т. 1—3 — 1319 с.
3. Введенский В. А. Заметки и критические очерки по вопросам эксплуатации русских железных дорог. — С. Петербург, 1903. — 110 с.
4. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». — М.: Техинформ, 2007. — 527 с.
5. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов. — М.: Транспорт, 1968. — 112 с.
6. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов. — М.: Транспорт, 1988. — 175 с. ●

TRAIN QUEUING AT RAILWAYS

Levin, Dmitry Yu. — Ph.D. (Tech), associate professor at the department of operations management and transport safety of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

Insufficient consideration of irregularity of train traffic causes lack of tracks at the stage of designing and reconstruction of stations, underestimation of resources during development of technical specifications, and underestimation of indices during development of technological processes etc. In order to evaluate irregularity of train traffic the article proposes to use the queuing theory that permits adapting necessary documents used for design and establishing of technological standards. The research used simulation to study real process of train operations, to obtain features of train queuing, to analyze changes of indices that depend on traffic intensity growth. The achieved results can contribute to increase of veracity and validity of decision-making, operation planning and freight and train operation management.

ENGLISH SUMMARY

Background. Queues to obtain service are characteristic of all the spheres of human activities, and railways don't make an exception. Queues at Russian railways were first mentioned at the end of 19th century [3], when bottlenecks happened yearly from autumn to spring during the period of forwarding of grain towards southern and Baltic ports. Later the same situations repeated due to expectation of acceptance of goods intended for forwarding, to delays in technological operations, in train departures, in bringing up of trains for loading etc. But still this problem was not studied.

Almost a half of time that the cars spend at modern classification yards is explained by interoperation demurrage, which causes non-productive extra costs, inefficient use of rolling stock and of transit capacity of railways.

Now the organization of rail cars' flows is accomplished on the basis of the plans of train making-up. Practicability of making up of trains intended to go to certain destinations within those plans is determined by surplus of reduced savings received from making up of trains which go directly to their destination without handling at transient classification

yards as compared to costs of cumulating of trains at the station where making up of trains is accomplished [4]. It is assumed that all the made-up trains afterwards strictly respect the schedule and their time in transit for the same destination is always the same. And the time spent by trains of different destinations isn't taken into account.

During station and track section designing, technical regulation, developing of standards one usually groundlessly proceeds from the assumption that traffic process is regular. As the result the article notes deficiency of station tracks, lack of transit capacity at important mainlines, loading of freight handling facilities over optimum level, deficiency of handling capacity of classification yards, and that scheduled volumes of train traffic exceed present capacity of railway sections, the number of made-up trains exceeds the number of available locomotives.

The general cause of emerging queues is the inconformity of cargo, cars, trains' flows with capacity to render relevant services. Even when mean daily volume of flow does not exceed transit, handling, unloading capacity, its irregularity and fluctuations of service time cause queues.

The studies of irregularities of traffic process were begun in 1968 by professor A. C. Ugrumov [5]. Then an important number of publications showed the objective character of that phenomenon. For instance only 20% of cars are unloaded during the first half of a day. But declaration of evident irregularity has not yet changed the situation. Reality differs from regulations.

Objectives. The objective of the research was to reveal main laws and to determine the impact of irregularity of traffic process on different aspects of organization of train and freight operations.

Methods. The main method that was used for research was mathematical simulation (supported by some tools as for instance approximation by linear function).

As the train operation is a typical system of waiting (queuing) theory, then some of its characteristics were used to assess train traffic:

- incoming flow of trains is determined by intensity of making-up of trains and distribution of intervals of arrival of the trains;

